doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.02.037

某 330 kV 输电线路铁塔铁附件断裂失效分析*

石华洲,武　鑫,晏得才
(甘肃电力科学研究院技术中心有限公司,甘肃 兰州　730050)

摘　要:文章针对 330 kV 输电线路铁塔中铁附件断裂事件,结合无损检测和理化检验的方法,通过宏观检查、结构尺寸测量、化学成分分析、机械性能试验、金相检验、断口及断面分析等试验手段,对铁塔铁附件断裂的真实原因进行了全面分析。通过对铁附件样品在断裂前产生的明显塑性变形以及断口发生在塔材螺栓孔薄弱部位且断面呈韧性断裂的分析可知,铁附件样品在断裂前承受了超过材料承载能力的极限弯曲应力和扭转应力,由此引起螺钉孔应力集中部位产生变形和开裂,造成了整个铁塔的倾覆。同时,还提出了参考性措施和建议,为下一步全面开展同类问题的隐患排查处理和危险防范提供科学依据。

关键词:断裂;检验方法;措施;建议
中图分类号:TM75　　文献标识码:A　　文章编号:1007-4414(2024)02-0143-04

Fracture Failure Analysis of Iron Accessories of a 330kV Transmission Line Tower

SHI Hua-zhou, WU　Xin, YAN De-cai
(*Gansu Electric Power Research Institute Technology Center Co., Ltd, Lanzhou　730050, Gansu, China*)

Abstract: Aiming at the fracture of iron fittings in 330 kV transmission line towers, and combining with the nondestructive testing and physical and chemical testing methods, the real causes of the iron fittings fracture in towers are comprehensively analyzed by means of macroscopic examination, fracture inspection, structural size measurement, chemical composition analysis, hardness inspection, mechanical property test, metallographic examination, scanning electron microscope fracture and energy spectrum analysis. It is found that the samples of iron fittings had obvious plastic deformation before fracture, and the fracture occurred in the weak parts of bolt holes in tower materials, and the section was characterized by ductile fracture. Before the fracture, the iron accessory sample bears a great bending and torsion stress, which exceeds the bearing capacity limit of the material, resulting in the deformation and cracking of the stress concentration part of the screw hole, which leads to the overturning of the whole iron tower. Reference measures and suggestions are put forward, which would provide a scientific basis for the next comprehensive investigation, treatment and prevention of hidden dangers of the similar problems.

Key words: fracture; inspection methods; measures; suggestions

0　引　言

近年来某地区受雨雪冰冻恶劣天气影响,多条输电线路出现不同程度覆冰,使某 330 kV 输电线路因覆冰严重造成铁塔扭曲倾倒故障。事件发生后,专业技术人员迅速对 330 kV 输电线路铁塔倾倒和变形情况进行现场勘察,并对塔材变形及断裂原因做出了初步分析。同时,对变形断裂的塔材进行进一步材质及性能试验,以确定此次故障原因中是否存在塔材质量因素。针对上述情况,根据《角钢塔抽检作业规范》及其他相关标准要求,拆除已经变形倾倒的原#1 塔和#2 塔,然后对不同部位和规格的塔材取样,开展解体失效分析试验。通过宏观检查、外形尺寸测量、化学成份分析、机械性能和金相检验等一系列检测和分析工作,对塔材质量做出判断,防止类似问题再次发生,以确保输电线路铁塔安全可靠运行。

1　检　验

1.1　宏观及塔材变形特征

某地区 330 kV #1、#2 塔倾倒后,#1 塔塔型为 JG2,呼高 21 m,水平转角左 28°54′,#2 塔塔型为 JG1,呼高 27 m。图 1、2 分别为#1 塔和#2 塔倒塔后塔材变形现场情况。两铁塔均向内角倾倒,倾倒后塔材变形最严重部发生在铁塔中下段,倾倒后铁塔基础依然完好。

图 1　#1 塔倾倒后现场情况

图 2　#2 塔倾倒后现场情况

* 收稿日期:2023-09-26
作者简介:石华洲(1986-),男,甘肃靖远人,工程师,研究方向:特种设备检验检测、失效分析。

从#1、#2 铁塔倾倒后塔材变形及损环情况来看，塔材断裂前承受了较大弯曲应力，使塑性严重变形。由于过大的弯曲应力造成螺孔应力集中部位产生撕裂且大部分塔材开裂部位出现在螺孔处。从观察到的断口看，未发现有脆性断口存在。综上，初步判断造成塔材变形、断裂的原因为其承受的载荷超过了材料承载能力。其次，线路存在覆冰舞动，在导线舞动荷载作用下，耐张塔发生长时间反复摇摆、扭转，铁塔螺栓出现磨损、松动、脱落、或者被角钢切断，造成整体结构破坏，进而造成倒塔[1]。

1.2　样品外观检查及尺寸测量

从#1、#2 塔共取得不同部位及规格的塔材样品共计 19 件，取样部位为铁塔变形最严重部位，分别位于铁塔 8 段、9 段和 10 段。其中#1 塔塔材样品 10 件，#2 塔塔材样品 9 件，主材样品材质为 Q345B，共 6 件；辅材样品为材质 Q235B，共 13 件。各塔材样品取样部位、编号及规格材料如表 1 所列。

从样品外观看，塔材表面状况及镀锌层完好。除#1-9 和#2-7 两个试样外，其余试样均存在局部或整体的弯曲和扭曲变形。除此之外，有 9 个试样上存在有原始断口，断裂均发生在角钢上螺栓孔部位。这说明材料在断裂前承受了较大的弯曲应力和扭转应力，造成螺栓孔等应力集中部位开裂[2]，如图 3、4 所示。

对样品外形尺寸进行测量，并与原设计图纸塔材规格进行比对发现，样品塔材选用规格与原设计相符。采用游标卡尺对所有塔材样品角钢厚度（包括镀锌层）进行测量，并采用超声波测厚仪从角钢两侧面对角钢厚度进行复测，结果如表 2 所列，从实际测厚结果看，部分样品厚度在包括镀锌层的情况下均为正偏差，有 6 个样品壁厚为负偏差，均在允许标准范围之内。

表 1　塔材样品编号、取样部位及材质规格

序　号	塔　号	样品号	取样部位	规　格	材　质
1		#1-1	10 段	L100×7	Q235B
2		#1-2	8 段	L90×7	Q345B
3		#1-3	9 段	L45×4	Q235B
4		#1-4	9 段	L100×7	Q235B
5	#1	#1-5	8 段	L140×12	Q345B
6		#1-6	8 段	L50×4	Q235B
7		#1-7	9 段	L100×7	Q235B
8		#1-8	10 段	L50×4	Q235B
9		#1-9	9 段	L160×12	Q345B
10		#1-10	8 段	L40×4	Q235B
11		#2-1	9 段	L100×8	Q235B
12		#2-2	8 段	L100×7	Q235B
13		#2-3	9 段	L140×12	Q345B
14		#2-4	9 段	L100×8	Q235B
15	#2	#2-5	10 段	L50×4	Q235B
16		#2-7	10 段	L56×4	Q235B
17		#2-8	10 段	L140×14	Q345B
18		#2-9	8 段	L140×10	Q345B
19		#2-10	8 段	L40×4	Q235B

图 3　#2-2 样品开裂形貌

图 4　#2-3 样品开裂形貌

表 2　塔材角钢样品厚度测量结果　　/mm

序　号	样品号	规　格	游标卡尺测量结果三点平均值		测厚仪测量结果三点平均值		最大偏差
			A 边	B 边	A 边	B 边	
1	#1-1	L100×7	7.4	7.2	7.2	7.1	+0.4
2	#1-2	L90×7	7.1	8.4	7.4	7.7	+1.4
3	#1-3	L45×4	4.2	4.2	4.3	4.0	+0.3
4	#1-4	L100×7	7.1	7.2	6.7	6.7	-0.3
5	#1-5	L140×12	12.1	12.3	/	/	+0.3
6	#1-6	L50×4	4.1	4.2	4.2	4.3	+0.3
7	#1-7	L100×7	7.2	7.5	6.8	7	-0.2
8	#1-8	L50×4	4.4	4.3	/	/	+0.4
9	#1-9	L160×12	12.1	11.9	/	/	-0.1
10	#1-10	L40×4	4.2	4.0	/	/	+0.2
11	#2-1	L100×8	8.5	8.5	/	/	+0.5
12	#2-2	L100×7	7.0	7.1	/	/	+0.1
13	#2-3	L140×12	12.4	12.3	/	/	+0.4
14	#2-4	L100×8	8.5	8.6	/	/	+0.6
15	#2-5	L50×4	4.5	4.5	/	/	+0.5
16	#2-7	L56×4	3.9	3.8	/	/	-0.2
17	#2-8	L140×14	14.2	13.8	/	/	-0.2
18	#2-9	L140×10	10.4	10.3	9.9	10.1	-0.1
19	#2-10	L40×4	4.2	4.0	/	/	+0.2

1.3 样品成份分析

去除表面镀锌层后,采用 SPECTROTEST 移动式定量光谱仪对 19 个样品进行光谱分析,试验结果如表 3 所列。从试验结果来看,各样品所含元素及含量与标称牌号(Q235B、Q345B)相符,Mn、Si 等主要合金元素含量均符合相关标准要求[3]。个别试样 C 含量略高于标准规定值,部分样品中 S、P 含量超出标准规定值。

由于光谱测试位置是在去除镀锌层后的试样表面,经对比发现,光谱试验 S、P 含量测量值偏高,这与表层金属去除情况有关,由此推断,表层金属中 S、P 含量偏高是受到镀锌工艺及表面处理的影响。为进一步核实光谱分析结果,另取 Q235B 和 Q345B 试样各一个进行化学成份分析,抽查的 Q235(#1-1)和 Q345(#2-8)两个试样化学成份均符合相关标准要求,测试结果如表 4 所列。

总体来看,所抽取样品化学成分基本满足相关标准要求。个别样品 S、P 杂质元素含量偏高与试样表层金属去除厚度不足有关,且 S、P 元素主要影响钢材的高温和低温韧性,对钢材常温机械性能和铁塔整体强度不会构成直接影响,这点在机械性能试验结果中也得到验证。

表 3 塔材角钢样品光谱分析结果

序号	样品号	材质	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	V
1	#1-1	Q235B	0.166	0.178	0.468	0.025	0.026	/	/	/	/	/	/	/
2	#1-2	Q345B	0.230	0.281	1.397	0.035	0.055	0.088	<0.003	0.023	0.017	0.037	0.002	0.005
3	#13	Q235B	0.213	0.271	0.412	0.020	0.037	/	/	/	/	/	/	/
4	#1-4	Q235B	0.174	0.155	0.466	0.023	0.030	/	/	/	/	/	/	/
5	#1-5	Q345B	0.191	0.378	1.475	0.033	0.037	0.047	<0.003	0.014	0.012	<0.005	0.002	0.006
6	#1-6	Q235B	0.181	0.171	0.478	0.038	0.052	0.036	0.026	0.012	0.033	<0.005	0.001	0.005
7	#1-7	Q235B	0.173	0.166	0.456	0.032	0.036	/	/	/	/	/	/	/
8	#1-8	Q235B	0.200	0.170	0.475	0.026	0.045	/	/	/	/	/	/	/
9	#1-9	Q345B	0.202	0.473	1.372	0.031	0.048	0.010	<0.003	<0.008	0.005	<0.005	0.004	0.026
10	#1-10	Q235B	0.200	0.259	0.413	0.035	0.048	/	/	/	/	/	/	/
11	#2-1	Q235B	0.159	0.167	0.438	0.026	0.014	/	/	/	/	/	/	/
12	#2-2	Q235B	0.188	0.213	0.487	0.021	0.010	/	/	/	/	/	/	/
13	#2-3	Q345B	0.228	0.304	1.571	0.031	0.025	0.042	<0.003	<0.008	0.009	<0.005	<0.001	0.006
14	#2-4	Q235B	0.208	0.204	0.442	0.023	0.015	/	/	/	/	/	/	/
15	#2-5	Q235B	0.162	0.183	0.417	0.030	0.046	/	/	/	/	/	/	/
16	#2-7	Q235B	0.181	0.131	0.363	0.017	0.027	/	/	/	/	/	/	/
17	#2-8	Q345B	0.200	0.274	1.561	0.032	0.033	0.035	<0.003	0.018	0.027	<0.005	<0.001	0.005
18	#2-9	Q345B	0.201	0.297	1.411	0.047	0.047	0.096	<0.003	0.033	0.026	<0.005	<0.001	0.005
19	#2-10	Q235B	0.221	0.258	0.556	0.044	0.035	/	/	/	/	/	/	/
GB/T1591 规定值		Q345B	≤0.20	≤0.50	≤1.70	≤0.035	≤0.035	≤0.30	≤0.10	≤0.50	≤0.30	≤0.07	≤0.20	≤0.15
GB/T700 规定值		Q235B	≤0.20	≤0.35	≤1.40	≤0.045	≤0.045	/	/	/	/	/	/	/

表 4 塔材角钢样品化学成分分析结果

样品号	材质	C	Si	Mn	P	S
#1-1	Q235B	0.18	0.22	0.52	0.021	0.016
#2-8	Q345B	0.19	0.31	1.54	0.016	0.025
GB/T1591 规定值	Q345B	≤0.20	≤0.50	≤1.70	≤0.035	≤0.035
GB/T700 规定值	Q235B	≤0.20	≤0.35	≤1.40	≤0.045	≤0.045

1.4 样品机械性能试验

从#1-1(Q235B)、#1-4(Q235B)、#1-5(Q345B)、#1-8(Q235B)、#1-9(Q345B)、#2-2(Q235B)、#2-3(Q345B)、#2-7(Q235B)、#2-8(Q345B)、#2-9(Q235B)等 10 个样品无明显塑性变形部位截取并加工试样,进行拉伸、冲击、弯曲等材料机械性能试验。按相关标准要求,每个样品做拉伸试样一根、弯曲试样一根、冲击试样一组三根,两个铁塔不同规格及材料的共 10 个样品机械性能试验结果如表 5、6 所列。

表 5　Q235 钢试样机构性能试验结果

试件号	材　质	屈服强度/MPa	拉伸试验抗拉强度/MPa	断后伸长率 A/%	冲击试验冲击吸收功（纵向）/J	180°弯曲试验
#1-1	Q235B	250	392	28	47、54、61	未裂
#1-4	Q235B	245	393	29	59、60、61	未裂
#1-8	Q235B	287	416	28	/	未裂
#2-2	Q235B	256	393	29	61、54、55	未裂
#2-4	Q235B	249	394	28	65、67、71	未裂
#2-7	Q235B	289	414	29	/	未裂
GB/T700 规定值	Q235B	≥235	370~500	26	≥27	未裂

表 6　Q345 钢试样机械性能试验结果

试件号	材　质	屈服强度/MPa	拉伸试验抗拉强度/MPa	断后伸长率 A/%	冲击试验冲击吸收功（纵向）/J	180°弯曲试验
#1-5	Q345B	357	551	28	101、108、94	未裂
#1-9	Q345B	357	547	29	133、133、145	未裂
#2-3	Q345B	362	561	29.5	121、134、115	未裂
#2-8	Q345B	351	552	28	91、114、121	未裂
GB/T700 规定值	Q345B	≥345	470~630	≥20	≥34	无可见裂纹

从试验结果看，所有 10 个样品常温机械性能均符合 GB/T 700-2006、GB/T 1591-2018、GB/T 232-2010 标准要求，检验结果合格。

1.5　样品金相检验

对#1、#2 两基倾倒铁塔上 Q235 和 Q345 两种材质塔材样品分别抽取一个试样进行金相检验，结果显示：两种材料基本组织均为铁素体和珠光体，组织均匀，未发现有超标夹杂物和异常组织存在。抽取试样金相组织检查结果如图 5、6 所示。

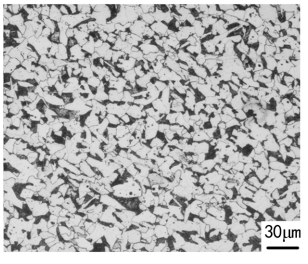

图 5　#1-9（Q345）试样金相组织形貌（200×）

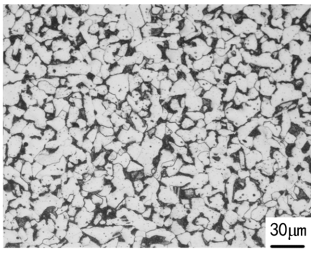

图 6　#1-3（Q235）试样金相组织形貌（200×）

2　综合分析与结论

上述试验结果表明，受损的#1 和#2 铁塔取样样品的塔材规格与设计相同，壁厚的偏差在公差允许范围之内。19 个塔材样品化学成分分析结果表明：塔材牌号与设计材料（Q235B、Q345B）相符，主要合金元素均符合相关标准要求。所选取的两基铁塔不同规格、不同材料的共 10 个样品机械性能指标均能满足相关标准的要求。所送样品在断裂前均产生明显塑性变形，断口发生在塔材螺栓孔薄弱部位且断面呈韧性断裂特征。由此判断样品塔材在断裂前承受了很大的弯曲和扭转应力，超过材料的承载能力极限，从而引起螺钉孔应力集中部位产生变形和开裂；并且塔材在断裂前承受垂直载荷增加，横向载荷、纵向载荷增加，遇到大风产生振动载荷，当受到各种载荷超过设计条件时，就会造成铁塔倒塔[4]。

3　措施和建议

此次#1 和#2 铁塔倾倒事件主要原因是由于铁塔在低温大风等极端气候条件下，线路覆冰造成铁塔过载，再在导线张力及风载的作用下，铁附件结构应力过大，造成塔材局部塑性变形和弯曲；螺栓孔边缘宏观及微观缺陷等薄弱部位由于应力集中生成裂纹，裂纹失稳快速扩展并汇集，最终导致塔材沿螺栓孔形成贯穿型韧性开裂并弯曲，造成铁塔倾覆[5]。

由上可知，输电线路覆冰对电网安全稳定运行产生很大的影响，为防止导线覆冰事故的发生必须采取有效的措施，建议如下。

（1）从设计、结构、材质、螺栓、紧固件等方面规范设计建设，通过采取加固措施并改进设计方案，以及力学性能试验，使铁塔符合国家钢结构设计规范和铁塔设计规程。

（2）综合考虑塔址环境，通过优化设计结构增强其可行性和安全性，提高抗风、抗震、抗自然灾害能力；对于强风、多地震、雨雪多的恶劣环境地区应采取差异化设计，采取增加铁塔载荷设计余量，适当提高设计覆冰厚度值，合理选择铁塔形式，提高线路抗冰能力。

（下转第 151 页）

ramics,2006(17):543-548.

[7] Priya S, Inman D J. Energy Harvesting Technologies[J].Springer Science Business Media,2009(2):49-58.

[8] Man D, Xu D, Kuang X C, et al. Analysis of Dynamic Characteristics of Tristable Piezoelectric Energy Harvester Based on the Modified Model [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, (2021):1-12.

[9] Sunithamani S, Lakshmi P. Simulationstudy on performance of MEMS piezoelectric energy harvester with optimized substrate to piezoelectric thickness ratio[J]. Microsystem Technologies-Micro and Nanosystems,2014,21(4):733-738.

[10] Hong Y, Sui L, Zhang M Y, et al. Theoretical analysis and experimental study of the effect of the neutral plane of a composite piezoelectric cantilever[J]. Energy Conversion and Management, 2018 (171):1020-1029

[11] Ahn J H, Hwang W S, Cho J Y, et al.A Bending-Type Piezoelectric Energy Harvester with a Displacement-Amplifying Mechanism for Smart Highways[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2018,73(3):330-337.

[12] Wang L, Ding J J, Jiang Z D, et al.A packaged piezoelectric vibration energy harvester with high power and broadband characteristics[J].Sensors and Actuators A-Physical,2019(295):629-636.

[13] Lu Q Q, Liu L W, Scarpa F, et al.A novel composite multi-layer piezoelectric energy harvester [J]. Composite Structures, 2018 (201):121-130.

[14] Yang X M, Y T Hu, et al. Electric field gradient effects in anti-plane problems of polarized ceramics[J].International Journal of Solids and Structures,2004,41(24-25):6801-6811.

[15] Talebitooti R.Daneshjoo K,Jafari S A M.Optimal control of laminated plate integrated with piezoelectric sensor and actuator considering TSDT and meshfree method[J].European Journal of Mechanics-A/Solids,2016(55):199-211.

[16] Fu G, Zhou S.On the size dependency of a dielectric partially covered laminated microbeam [J]. Thin-Walled Structures, 2021 (161):107489.

[17] Qi L. Energy harvesting properties of the functionally graded flexoelectric microbeam energy harvesters[J].Energy,2019(171):721-730.

[18] McMeeking R M.The energy release rate for a Griffith crack in a piezoelectric material [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004 (71):1149-1163.

（上接第 142 页）

氧老化性能和压缩永久变形稍好。且过氧化物体系相对更加充分，附近可能存在高密度的硫-硫键以防止个别键受电化学分解后发生龟裂变形[6]。

另外，金属电极在去离子水中漏电流存在电阻更低的路径，能够充分释放电流，从而使通过去离子水和橡胶界面的电流明显减小，避免了 EPDM 密封垫橡胶遭受到严重的电腐蚀作用。

当然，此次针对直流输电换流阀 EPDM 密封垫橡胶加速腐蚀试验仍有很多不足以及待探究的内容。一方面，受限于试验平台功能，未能获取 EPDM 密封垫电腐蚀的启动条件和完整过程；另一方面，关于如何调整橡胶组分配比以进一步增强耐电腐蚀能力，是下一步需要继续研究的部分。相信通过对平台的改进和 EPDM 工艺的探索，未来直流输电换流阀 EPDM 密封垫产品的开发会愈加成熟。

参考文献：

[1] 邹微波，唐道平，吴春宇.EPDM 橡胶材料的高低温老化失效[J].汽车工艺与材料，2022(9):55-58.

[2] 王　璐，侯锦秋，韩继先.导电橡胶板耐电化学腐蚀性研究[J].机电元件，2021，8(4):56-58.

[3] 肖　晋，李华君，孙占华，等.换流阀均压电极密封圈失效机制分析及等效试验方法研究[J].机床与液压，2020，48(21):134-138.

[4] 晏年平，房子祎，万　华，等.高温硫化硅橡胶老化状况及表征技术研究进展[J].绝缘材料，2017，50(12):1-9.

[5] 董春雨，杨晓炯，张贵恩，等.耐盐雾腐蚀导电橡胶的制备与性能[J].兵器材料科学与工程，2022，45(5):59-63.

[6] 王　坤.三元乙丙橡胶(EPDM)耐热氧老化性能的研究[J].广东橡胶，2018(2):1-13.

（上接第 146 页）

（3）规范施工，规范安装，及时开展到货抽检和专项检测，加强镀锌层质量监督、几何尺寸检测、重量检测、焊缝质量检测等，确保符合标准要求。

（4）重覆冰地段，对于档距较大的，通过增加杆塔、缩小档距的措施来增加导线的过载能力，减轻杆塔荷载。

（5）开展电网防冰、除冰技术研究与应用。

（6）开展输变电线路杆塔状态评估及监测预警系统的研究与应用。

参考文献：

[1] 蒋兴良，易　辉.输电线路覆冰及防护[M].北京：中国电力出版出版社，2002.

[2] 刘泽洪.大规格角钢在输电铁塔的应用[M].北京：中国电力出版出版社，2011.

[3] 杨建平.架空输电线路钢管塔结构[M].北京：中国电力出版出版社，2011.

[4] 王梅义.大电网事故分析与技术应用[M].北京：中国电力出版出版社，2008.

[5] 刘和云.架空导线覆冰防冰的理论与应用[M].北京：中国铁道出版社，2001.